

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2019.01.08

北斗广域增强系统星钟和 星历误差改正算法研究

李 冉^{1,2}, 胡小工¹, 曹月玲¹, 唐成盼¹, 孟 鑫³, 常志巧⁴

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 4. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

摘要: 区域北斗星基增强系统提供等效钟差改正数统一修正星历和钟差误差。随着系统的建设发展, 新一代北斗星基增强系统将区分星历和钟差误差改正信息, 以提高差分改正精度。由于北斗卫星混合星座设计及区域监测网的局限, 星历和钟差误差的高精度分离计算面临着新的挑战。对北斗星基增强系统的星历和钟差改正算法进行了研究, 分别采用动力学和运动学模式计算了卫星星历和钟差改正数, 并基于北斗实测数据, 对两种处理模式的差分改正精度进行了对比研究。试验结果表明, 采用动力学和运动学差分方法, 得到的双频伪距实时定位精度分别为 1.76 m 和 1.78 m, 定位精度与 WAAS 及 EGNOS 相当。利用运动学和动力学差分改正数后均可得到分米级的精密单点定位 (precise point position, PPP) 结果, 其中采用动力学广域差分改正数, 收敛后定位精度可达 15 cm; 采用运动学广域差分改正数, 收敛后定位精度可达 45 cm。

关键词: 北斗卫星导航系统; 星基增强系统; 广域差分改正算法; PPP

中图分类号: P228 **文献标识码:** A

1 引 言

为了提高卫星导航系统的定位服务精度, 很多国家或地区分别建立了针对 GPS (global positioning system) 和 GLONASS (global navigation satellite system) 的星基增强系统, 如美国的广域增强系统 (wide area augmentation system, WAAS)、欧盟地球静止导航重叠服务系统 (European geostationary navigation overlay service, EGNOS)、日本的多功能卫星星基增强系统 (multi-functional satellite augmentation system, MSAS)、印度的 GPS 辅助型静地轨道增强导航系统 (GPS-aided GEO augmented navigation, GAGAN) 等。这些星基增强系

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-05-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0501900); 国家自然科学基金 (41674041, 11203059); 上海市科学技术委员会基金 (16511103003)

通讯作者: 李冉, liran1219@aoe.ac.cn

统可通过地球静止轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星搭载的卫星导航增强信号转发器, 向用户实时提供广播星历、钟差改正信息以及电离层格网改正信息, 最终实现对原有卫星导航系统定位精度的提高。与其他 GNSS 星基增强系统不同, 北斗区域导航星基增强系统将轨道误差和钟差误差综合为一体, 以等效钟差的形式提供星历和钟差的综合差分改正。这种处理方法简便易行, 能够保证一定精度, 但忽略了卫星星历误差在不同方向的投影差异。当卫星轨道误差较大时, 等效钟差的改正精度会迅速降低。为了提高北斗星基增强系统的精度, 在北斗全球系统的星基增强系统建设中, 需要分别提供卫星轨道和钟差改正信息。由于在双频多系统标准下, 新一代星基增强系统可以采用双频观测量消除大部分电离层误差^[1], 不再需要电离层格网改正, 因此, 我们将主要研究星基增强系统中星钟和星历误差的修正方法。

研究如何优化星历和钟差差分改正模型, 可以有效提高系统的服务性能, 对新一代北斗星基增强系统有重要意义。对于星基增强系统中星历和钟差改正算法, 国内外专家已开展了一些研究, 例如, 美国的 WAAS 系统中, 人们采用了最小方差估计的快照算法和基于动态轨道模型的滤波方法来计算卫星轨道误差改正数, 然后计算卫星钟差改正数^[2]; 陈刘成等人^[3]在北斗区域导航系统动力学定轨的基础上, 提出了快速处理星历和星钟改正数的模型和方法; Cao 等人^[4]利用北斗系统特有的星地双向时间同步测量, 将卫星轨道误差和星钟误差进行分离, 提高了北斗差分改正精度; 吴显兵^[5]深入研究了实时轨道和钟差改正数解算的动力学模型和方法, 并采用基于非差和历元间差分组合模式的实时高频卫星钟差估计算法, 利用北斗实验分析, 得到了实时钟差确定精度优于 0.2 ns 的结果; 宋伟伟^[6]提出了一种混合差分精密钟差估计方法, 并采用伪距单差与相位双差方程同时估计, 解决了历元间差分估计方法中忽略初始卫星钟差偏差的问题。Lou 等人^[7]基于 BETS (BeiDou experimental tracking station) 和 MGEX (multi-GNSS experiment) 数据对北斗卫星精密定轨问题进行了分析和研究, 所得到的 IGSO (inclined geosynchronous satellite orbit) 和 MEO (medium Earth orbits) 卫星三维重叠轨道定位精度分别优于 20 cm 和 14 cm。目前, 在单系统精密定轨的基础上, 多模 GNSS 精密定轨的研究已大范围开展。人们基于其全球分布的 100 多个监测站数据联合解算 GPS, GLONASS, GALILEO 和北斗轨道, 结果表明, 除北斗 GEO 卫星切向重叠轨道差异较大外, 其他系统定轨精度都较高^[8]。本文将分别采用动力学和运动学两种模式计算卫星星历和钟差改正数, 并基于北斗实测数据对两种差分处理模式的改正精度进行对比分析。

2 动力学广域差分模型

卫星轨道误差具有变化缓慢, 且有系统性的特点, 人们可以先对卫星进行动力学精密定轨, 并外推精密轨道, 然后将卫星轨道固定为已知值, 利用伪距相位观测值计算精密卫星钟差。通过这种方法, 人们可以将外推轨道的剩余误差合并到卫星钟差中, 以确保差分改正信息的一致性, 从而保证用户的定位精度。动力学广域差分改正计算可分成两个独立的计算过程: 轨道改正数计算和钟差改正数计算, 即通过预报精密轨道来计算轨道改正数, 以及在固定预报精密轨道的基础上计算钟差改正数。因此在计算钟差改正数时, 我们减少了太阳光压

等代估参数，从而提高了钟差改正数的计算速度。动力学广域差分改正数的计算流程如图 1 所示。

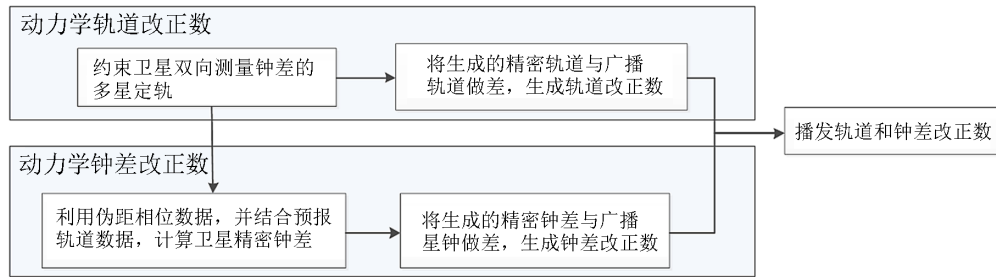


图 1 动力学广域差分改正数计算流程

2.1 动力学轨道改正数模型

Tang 等人^[9]提出了一种约束卫星双向测量钟差解算卫星轨道的定轨处理方法，其结果表明，该定轨策略可以减小 GEO 卫星的用户等效测距误差 (user equivalent range error, UERE) 和 IGSO 卫星的激光残差，并能保证 GEO 卫星在春/秋分点期间的轨道精度并不明显下降。

采用 Tang 等人给出的精密定轨处理方法，人们可以进行精确轨道确定，并可外推卫星预报轨道，通过将卫星预报轨道与对应历元的广播星历进行比较，生成卫星轨道改正数。

$$(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = orbit_{TWSTFT-based} - orbit_{eph} \quad , \quad (1)$$

其中， $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 是三维轨道改正数； $orbit_{TWSTFT-based}$ 是预报精密轨道，由约束卫星双向测量钟差的多星定轨生成； $orbit_{eph}$ 是利用广播星历计算的卫星轨道。

取更新周期内的卫星轨道改正数序列，并采用线性模型计算拟合参数，作为卫星轨道改正信息，以发播给用户使用。

2.2 动力学钟差改正数模型

利用非差消电离层组合观测值进行粗差剔除、周跳探测和修复，然后固定外推的预报轨道，采用批处理方式估计卫星钟差和接收机钟差参数，可得到精密卫星钟差。由于该方法不需要估计轨道及光压参数，参数估计数量减少，因此，计算速度明显提高。但为了保证钟差改正信息的实时性要求，还需要对计算的精密卫星钟差进行短时预报。我们采用线性拟合模型，即在一般情况下，任意时刻钟差改正数 dx 与参考时刻的关系，用线性表达式表示：

$$dx(t) = dx_0 + dx_1(t - t_0) \quad , \quad (2)$$

其中， dx_0 和 dx_1 分别是参考时刻 t_0 的钟差改正数的常数项和速度项。

设 dx 表示钟差改正数，在 t_k 参考时刻，观测误差为 v_k ，则误差方程为：

$$dx(t_k) + v_k = dx_0 + dx_1(t_k - t_0) \quad . \quad (3)$$

设 \hat{x}_0 和 \hat{x}_1 为钟差改正数 dx_0 和 dx_1 的估计值, 则有:

$$\hat{x}(t_k) = \hat{x}_0 + \hat{x}_1(t_k - t_0) \quad (4)$$

根据最小二乘估计原则, 参数 \hat{x}_0 和 \hat{x}_1 的估值可由多次钟差改正数的数据求出。最后, 利用拟合参数结合线性模型得到的预报钟差, 与对应历元的广播钟差做差, 得到动力学钟差改正信息。

3 运动学广域差分模型

在已经公布的北斗用户接口控制文件 (interface control document, ICD)^[10]中指出, 通过对授权用户发播等效钟差改正数, 可统一修正卫星钟差误差和轨道误差在视向的投影。该模型具有算法简单且计算量小的优点, 但对轨道误差的修正精度有限。本文采用等效钟差和卫星三维轨道改正数计算方案, 分离钟差改正数和轨道改正数, 利用高精度相位数据进行历元间改正约束, 提高了轨道改正数处理精度。此外, 还对该运动学差分改正算法的用户改正精度进行了分析研究。

运动学差分改正不依赖于卫星轨道动力学建模, 而是依据卫星观测模型解算卫星轨道和钟差改正数, 其计算流程如图 2 所示。

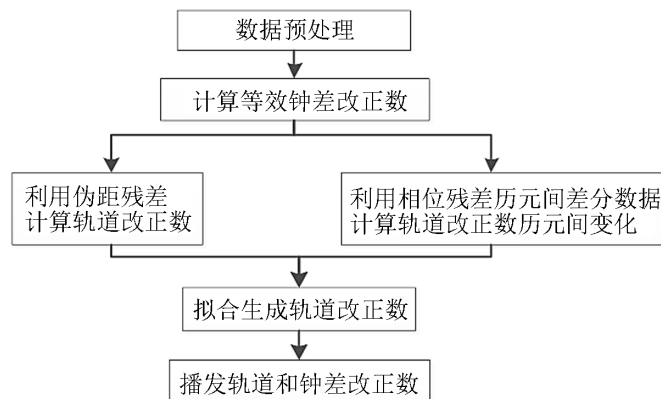


图 2 运动学广域差分改正数计算流程

3.1 运动学钟差改正数模型

我们采用经 CNMC (code noise and multipath correction) 算法^[11]平滑后的伪距观测量以减小伪距多路径影响, 然后消除星地几何距离及传播路径的大气改正等公共误差, 计算伪距残差, 并以此为基础计算钟差改正信息, 如式 (5) 所示。

$$\Delta\rho_i^j = c\delta t_i - \varepsilon_{\text{orb}} - \varepsilon_{\text{satclk}} + \varepsilon_i^j \quad (5)$$

其中, $\Delta\rho_i^j$ 是接收机 i 与卫星 j 之间的伪距残差, c 是光速, δt_i 是监测站钟差, $\varepsilon_{\text{satclk}}$ 是卫星钟差误差, ε_{orb} 是轨道误差在视向的投影, ε_i^j 为观测噪声。

以等效钟差改正数 $ESclkcor$ 统一修正卫星钟差误差和轨道误差在视线方向上的投影, 具体可以表示为:

$$ESclkcor = \varepsilon_{orb} + \varepsilon_{satclk} \quad (6)$$

在运动学卫星钟差误差监测方程 (5) 中, 我们固定主控站的站钟, 并利用最小二乘法实时解算其他监测站 δt_i 和等效钟差改正数 $ESclkcor$ 。

3.2 运动学轨道改正数模型

因为卫星钟差误差和轨道误差耦合在一起, 所以同时求解将令法方程病态影响解算值的准确性。因此, 在伪距残差中, 我们先消除已解算的等效钟差改正数, 再解算卫星轨道改正数。

$$\delta\varepsilon_{orb} = \Delta\rho_i^j - c\delta t_i + ESclkcor = a_i x + b_i y + c_i z \quad (7)$$

其中, $\delta\varepsilon_{orb}$ 是星历误差在测站视线方向上的投影误差, a_i, b_i, c_i 分别是星历误差在该监测站方向上的投影系数, x, y, z 为三维轨道误差。

假设监测站连续跟踪某颗卫星, 在没有周跳发生的情况下, 对历元间的相位观测值差分能够消除模糊度参数, 从而可以通过相位残差历元间差分数据计算轨道改正数历元间变化。

$$\begin{cases} \Delta L_i^j = c\delta t_i - \delta\varepsilon_{orbi} - ESclkcor + \lambda N + \varepsilon_i^j \\ d(\Delta L_i^j) = cd(\delta t_i) - (\delta\varepsilon_{orbi} - \delta\varepsilon_{orbi-1}) - (ESclkcor_i - ESclkcor_{i-1}) + \Delta\varepsilon_i^j \end{cases} \quad (8)$$

其中, ΔL_i^j 是双频无电离层载波相位残差, λ 为波长, N 为模糊度, ε_i^j 为载波相位噪声, $d(\Delta L_i^j)$ 是相位残差历元间差分结果, $d(\delta t)$ 是历元间接收机钟差的差值。人们可以利用卫星共视法实现站间时间同步^[12], 从而将各监测接收机的钟差消除。

轨道误差历元间变化量 $d(\overline{\Delta L}_i^j)$ 可以由式 (9) 求解:

$$\begin{aligned} d(\overline{\Delta L}_i^j) &= d(\Delta L_i^j) - cd(\delta t_i) + d(ESclkcor) \\ &= a_i(x_i - x_{i-1}) + b_i(y_i - y_{i-1}) + c_i(z_i - z_{i-1}) \\ &= a_i dx_i + b_i dy_i + c_i dz_i \quad (9) \end{aligned}$$

其中, dx_i, dy_i, dz_i 分别为轨道误差在三个方向上的历元间变化量。

通过以上伪距残差计算轨道改正数绝对值, 再利用相位残差历元间差分计算轨道改正数历元间变化, 最终可将高精度的轨道改正数历元变化和伪距计算的轨道改正进行综合, 获取轨道改正数。

4 结果与分析

本文比较动力学广域差分与运动学广域差分的差异, 并分别通过差分后用户测距误差和双频实时伪距单点定位, 对两种差分改正模型的处理精度进行对比分析。同时, 我们还将北斗星基增强服务性能与国际上成熟的星基增强系统 WAAS 和 EGNOS 的服务性能进行对比

分析, 并研究星基增强差分改正信息在精密单点定位中的应用。研究结果可为中国星基增强系统建设提供参考。

4.1 不同广域差分模型对比

无论是运动学广域差分模型, 还是动力学广域差分模型, 都是采用中国区域监测网 6 个监测站的北斗观测数据进行计算, 监测站分布在北京、三亚、喀什、成都、哈尔滨和乌鲁木齐。两种差分改正模型的计算方法见第 2 章和第 3 章, 其中动力学模式下精密定轨的预报轨道径向精度约为 0.24 m, 精密钟差处理精度约为 0.2 ns。通过对运动学和动力学差分改正数计算模式进行对比分析, 我们总结了两种差分改正模式的差异, 如表 1 所示。

表 1 两种差分改正数计算模式的区别

| | 运动学模式 | 动力学模式 |
|---------|--|--|
| 钟差改正数 | 在扣除各项公共误差的伪距残差的基础上, 建立关于各卫星钟差改正数和各监测接收机站钟的方程, 并利用最小二乘法求解 | 在固定卫星预报轨道基础上, 利用伪距相位观测数据, 采用最小二乘批处理算法解算卫星钟差, 并与广播星钟做差, 得到卫星钟差改正数 |
| 轨道改正数 | 首先, 对观测值扣除钟差改正数; 然后, 基于伪距观测值计算轨道误差改正数, 并基于相位历元间差分观测值计算轨道改正数变化; 最后, 综合轨道误差改正量和轨道改正数变化, 得到最终的轨道误差改正数 | 通过约束卫星双向测量钟差的方式, 进行多站多星动力学定轨, 再将所得到的卫星精密轨道与广播星历做差, 生成卫星轨道改正数 |
| 观测数据 | 经 CNMC 算法处理的伪距数据和相位历元间差分数据 | 原始伪距相位数据 |
| 模糊度处理方案 | 相位历元间差分消除 | 估算 |
| 对流层参数方案 | 采用监测站实测温度、相对湿度和大气压等气象参数信息, 结合 Saastamoinen 模型, 计算对流层延迟 | 每 3 h 估计天顶对流层延迟参数, 采用全球投影函数 (global mapping function, GMF) |
| 耗时统计 | 实时生成钟差和轨道改正数 | 钟差改正数解算时间小于 2 min (通过线性模型外推, 达到实时播发的目的) |

4.2 运动学和动力学 UDRE 结果

利用中国区域监测网 6 个监测站的北斗实测数据, 我们对动力学和运动学差分改正的服务精度进行对比分析。

导航系统定位服务精度可以通过两个指标描述: 精度衰减因子 DOP (dilution of precision) 和用户等效测距误差 $USERE$ (user equivalent range error), 其定位精度为 $DOP \times USERE$ 。 DOP 与星座设计和用户位置有关, 卫星星座设计确定后, 不同位置用户的 DOP 就已经确定。 $USERE$ 指用户测距信号上的残余误差, 由空间信号的用户测距误差 URE (user range error) 和用户设备误差 UEE (user equipment error) 引起, 与卫星星历误差、卫星钟差误差、大气模型误差、多路径噪声、接收机钟差误差等相关。在现有星座设计条件下, 只

能通过降低 $UERE$ 的方式来提高导航用户定位精度^[12]。而用户差分测距误差 $UDRE$ (user differential range error) 反映了差分后的伪距残差, 用来评估差分模型的改正精度。

对于用户定位, 同历元不同卫星的 $UERE$ 间相同的部分可被接收机钟差吸收, 而差异部分将影响用户的定位参数计算。通过对同历元各卫星的 $UERE$ 之间偏差的时间序列进行统计, 人们可了解其对定位精度的影响。

我们选取了 2016 年 7 月 27 日中国北斗卫星导航系统实测伪距相位观测数据, 并分别计算了双频用户在开放服务和授权服务下用户等效测距误差。相对于开放用户, 授权用户可接收实时解算的差分改正数, 以提高定位精度^[13], 其中授权服务下的差分改正数分别采用动力学广域差分模型和运动学广域差分模型解算。我们统计了在中国区域均匀分布的 6 个地面监测站所观测到的对所有可见卫星的 $UERE$ 的均方根 RMS (root mean square) 误差, 如图 3 所示, 其中 $UERE_{os}$ 为开放服务下的 $UERE$, $UDRE_{kin}$ 表示采用运动学差分改正数后的 $UDRE$, $UDRE_{dyn}$ 表示采用动力学差分改正数后的 $UDRE$ 。

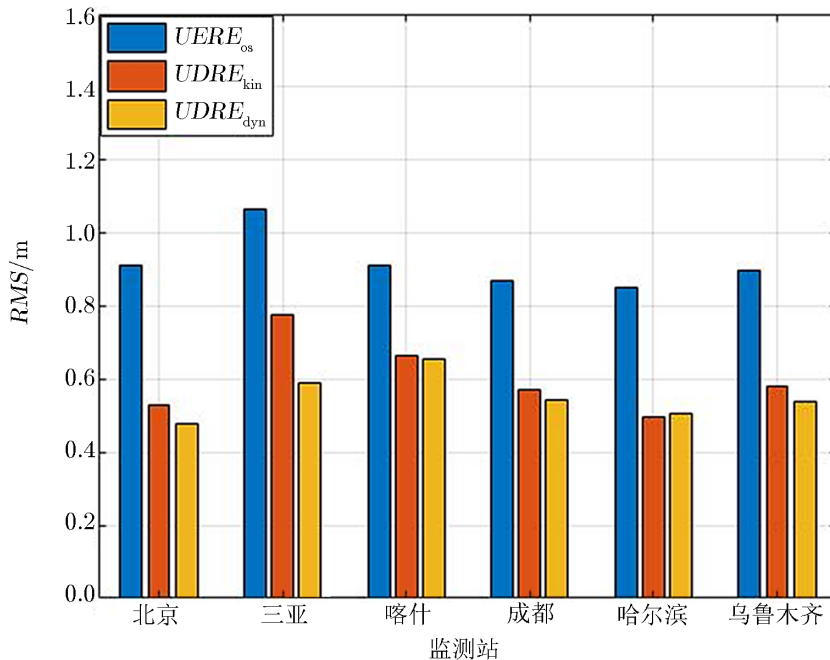


图 3 不同监测站的 $UERE$ 统计

由图 3 可以看出, 与开放服务下各监测站的 $UERE$ 相比, 无论采用动力学差分改正数, 还是运动学差分改正数, 监测站的 $UERE$ 都得到有效降低, 并且两种方法对不同监测站的 $UERE$ 降低程度不同。表 2 统计了 6 个监测站的 $UERE$ 结果。

统计结果显示, 通过动力学广域差分方法, 监测站的平均 $UERE$ 由 0.92 m 降为 0.55 m, 定位精度比改正前提高了 40%; 通过运动学广域差分方法, 监测站的平均 $UERE$ 降为 0.60 m, 定位精度比改正前提高了 35%。

表 2 不同监测站的 $UERE$ 统计

| 监测站 | $UERE_{os}$ | $UDRE_{kin}$ | $UDRE_{dyn}$ |
|-------|-------------|--------------|--------------|
| 北京站 | 0.91 | 0.53 | 0.48 |
| 三亚站 | 1.07 | 0.78 | 0.59 |
| 喀什站 | 0.91 | 0.66 | 0.66 |
| 成都站 | 0.87 | 0.57 | 0.54 |
| 哈尔滨站 | 0.85 | 0.50 | 0.50 |
| 乌鲁木齐站 | 0.90 | 0.58 | 0.54 |

4.3 运动学和动力学定位结果

我们利用北斗卫星系统实测伪距相位数据, 分别计算了在开放服务和授权服务下, 监测站双频实时伪距单点定位结果, 其中, 授权模式下分别采用动力学广域差分改正数和运动学广域差分改正数, 计算双频实时伪距单点定位精度。

由于监测站的坐标已由 GPS 精确测定, 位置精度优于 10 cm, 因此, 可以此作为准确值评估定位误差。

为全面分析北斗卫星导航系统用户定位精度, 我们计算了在中国区域均匀分布的 6 个监测站 24 h 定位结果, 如图 4 所示 (以北京、三亚和成都为例), 其中红色为公开服务下的定位精度, 绿色为增加运动学改正数后的定位精度, 蓝色为增加动力学改正后的定位精度。

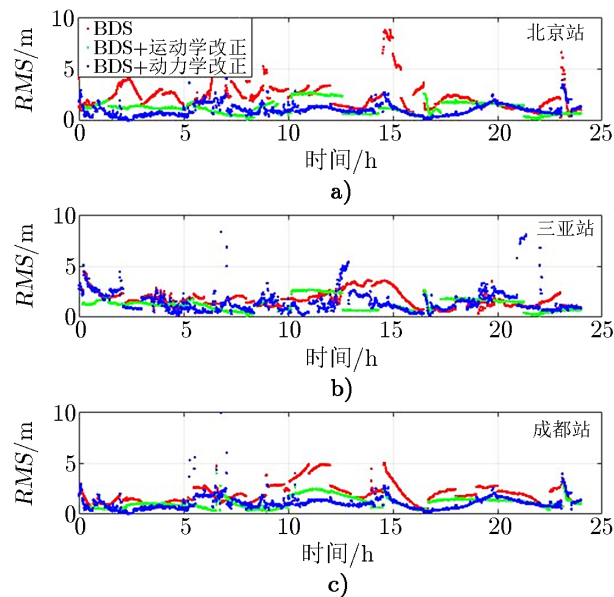


图 4 不同广域差分模式定位结果时间序列

从图 4 可以看出, 在授权模式下运动学和动力学差分改正模型都有效地提高了定位精度。表 3 分别统计了 6 个监测站分别采用动力学和运动学差分改正数后的定位精度。

表 3 不同监测站的定位结果统计

| 监测站 | 北京 | 三亚 | 喀什 | 成都 | 哈尔滨 | 乌鲁木齐 | 平均 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| 广播星历定位精度/m | 2.82 | 1.94 | 3.04 | 2.25 | 2.40 | 2.98 | 2.57 |
| 增加动力学改正后定位精度/m | 1.67 | 1.42 | 2.02 | 1.27 | 1.87 | 2.32 | 1.76 |
| 动力学改正后精度提高/(%) | 41 | 27 | 34 | 44 | 22 | 22 | 32 |
| 增加运动学改正后定位精度/m | 1.96 | 1.87 | 2.05 | 1.27 | 1.65 | 1.86 | 1.78 |
| 运动学改正后精度提高/(%) | 30 | 4 | 33 | 44 | 31 | 38 | 31 |

从 6 个监测站的统计结果可以看出, 经过差分改正之后, 用户的定位精度均有所提高, 其中运动学差分双频平均定位误差由 2.57 m 降至 1.78 m, 定位精度提高了 31%; 动力学差分双频平均定位误差降至 1.76 m, 定位精度提高了 32%。

4.4 WAAS 及 EGNOS 定位结果

我们用同样的方法对其他国家和地区的星基增强系统的服务性能进行了精度分析。我们分别选择了 EGNOS 和 WAAS 覆盖范围内的国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 的 3 个监测站的实测数据, 结合 EGNOS 和 WAAS 系统发播的差分信息进行实时伪距单点定位。我们采用位于欧洲境内的 HUEG 站、SOFI 站和 GRAS 站 2016 年 7 月 27 日的观测数据, 验证了 EGNOS 系统的服务性能; 采用美国境内的 WIDC 站、WCH1 站和 AMC2 站的观测数据, 验证了 WAAS 系统的服务性能, 以分别试验监测站在基本导航和增加差分改正数模式下的定位精度。

从图 5 和图 6 可以看出, 采用 WAAS 及 EGNOS 系统播发的差分改正信息, 定位精度均得到提高。表 4 统计了监测站在基本导航和增加 WAAS/EGNOS 差分改正数模式后的定位精度。

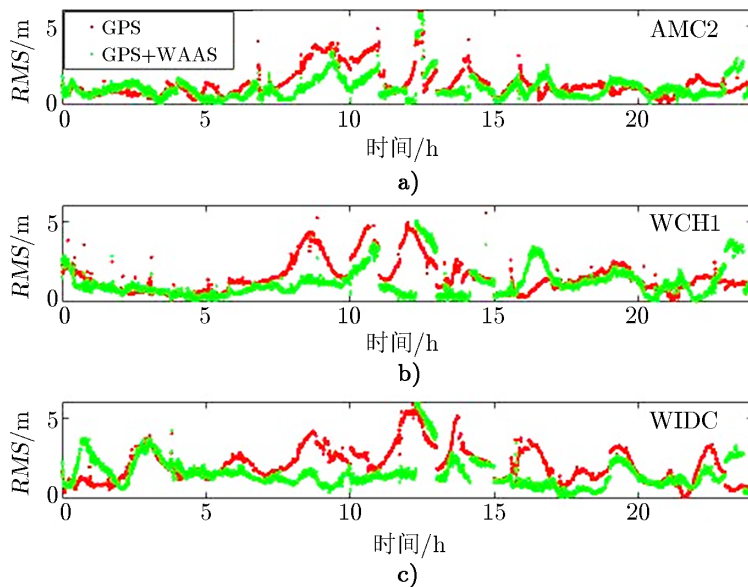


图 5 WAAS 的定位结果

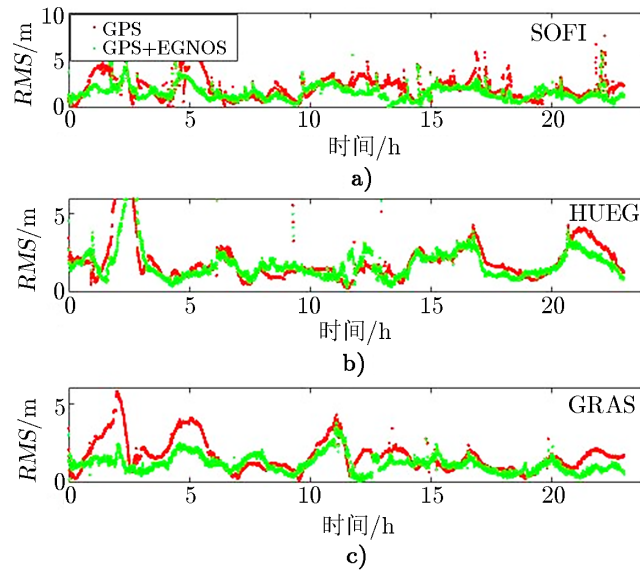


图 6 EGNOS 的定位结果

表 4 WAAS/EGNOS 的定位结果统计

| | WAAS 监测站 | | | 平均 |
|--------------|-----------|------|------|------|
| | WIDC | WCH1 | AMC2 | |
| GPS 定位精度/m | 2.38 | 1.90 | 1.63 | 1.97 |
| WAAS 定位精度/m | 1.82 | 1.52 | 1.27 | 1.54 |
| 精度提高/(%) | 24 | 20 | 22 | 22 |
| | EGNOS 监测站 | | | 平均 |
| | HUEG | SOFI | GRAS | |
| GPS 定位精度/m | 2.43 | 2.48 | 1.93 | 2.28 |
| EGNOS 定位精度/m | 2.16 | 1.81 | 1.30 | 1.76 |
| 精度提高/(%) | 11 | 27 | 33 | 23 |

从统计结果可以看出, WAAS 和 EGNOS 提供的差分改正数有效提高了监测站的定位精度, 其中利用 WAAS 提供的差分改正信息, 监测站平均定位精度为 1.54 m; 利用 EGNOS 提供的差分改正信息, 监测站的平均定位精度为 1.76 m, 这与北斗卫星增强系统实时伪距单点定位精度相当。

4.5 精密单点定位结果

我们选取了位于中国武汉的 MGEX 监测站中的 JFNG 站进行试验。JFNG 站配备 TRIMBLE NETR9 接收机, 可以接收北斗观测数据, 并且监测站的精确坐标可以从网站 <ftp://ftp.cddis.eosdis.nasa.gov/> 获取。利用在中国区域均匀分布的 6 个地面监测站 (北京站、三亚站、喀什站、成都站、哈尔滨站和乌鲁木齐站), 分别采用动力学和运动学方法计算的差

分改正数进行精密单点定位，同时采用 IGS 分析中心发布的北斗精密轨道和钟差进行精密单点定位，以验证 PPP 结果的可靠性。

我们选取了 2016 年 7 月 27 日 JFNG 站的北斗观测数据，图 7 为采用运动学和动力学差分改正信息的精密单点定位结果。

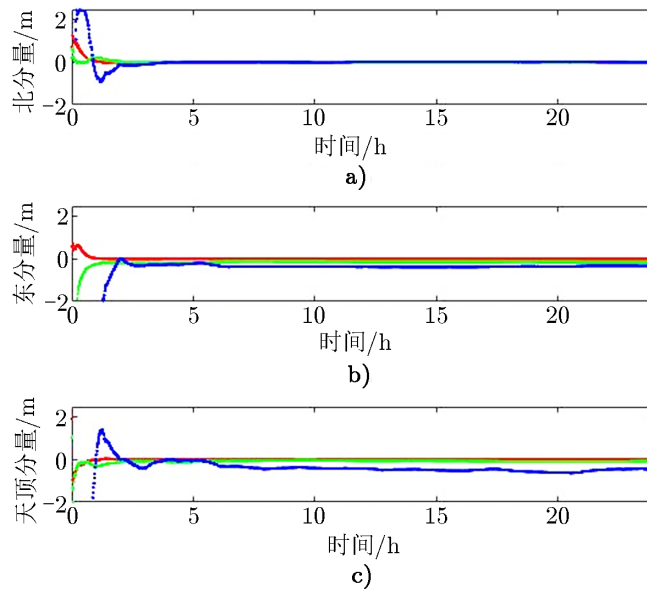


图 7 不同模式精密单点定位结果

在图 7 中，红线为 IGS 的定位结果，绿线为采用动力学广域差分改正数的定位结果，蓝线是使用运动学广域差分改正数的结果。

可以看出，采用 IGS 和动力学广域差分改正数，定位结果均快速收敛，而采用运动学方式，则收敛时间较长。表 5 中，我们列出了收敛后能够达到的定位精度。

| 定位精度 | 动力学 | 运动学 | IGS |
|------------|-------|-------|------|
| 北分量 (N) | 0.01 | -0.24 | 0.01 |
| 东分量 (E) | -0.13 | 0.06 | 0.01 |
| 天顶分量 (U) | 0.06 | -0.37 | 0.02 |
| <i>RMS</i> | 0.15 | 0.45 | 0.02 |

从表 5 可以看出，增加两种广域差分模式改正数后的精密单点定位结果都可达到分米级，且动力学模式精密单点定位结果明显好于运动学模式，这是因为动力学模式用到了相位数据，而运动学模式只用到相位历元间差分数据，仍受未被模型化的对流层误差的影响。

5 总结和讨论

针对北斗星基增强系统, 我们分别研究了用动力学方法和运动学方法解算卫星轨道和钟差改正数的两种模式, 同时重点阐述了用这两种模式解算卫星轨道改正数和钟差改正数的算法, 并利用北斗地面监测接收机实测数据, 对两种处理模式的差分服务精度进行了评估, 结果显示: 采用动力学广域差分模型和运动学广域差分模型, 差分改正后 $UDRE$ 分别为 0.55 m 和 0.60 m, 比差分改正前用户测距精度分别提高了 40% 和 35%; 差分改正后双频实时伪距单点定位精度分别为 1.76 m 和 1.78 m, 与基本导航用户相比, 精度分别提高了 32% 和 31%。以上结果表明, 两种差分改正模型对于基于伪距的导航服务性能大致相当。

采用动力学和运动学差分改正, 基于双频伪距的北斗星基增强服务的精度与 WAAS 和 EGNOS 差分服务的精度相当。利用运动学和动力学差分改正结果, 均可得到分米级的精密单点定位结果, 其中, 使用动力学广域差分改正信息, 收敛后定位精度可达到 15 cm。

动力学广域差分改正数精度依赖于多星定轨生成的精密轨道, 在高精度的轨道基础上才能得到更好的差分改正数, 因此, 轨道定位精度的提高对广域增强系统非常重要。随着北斗全球系统的发展, 星间观测数据的使用, 海外监测站的增加, 以及北斗光压模型的精化, 北斗卫星精密定轨精度可进一步提高, 从而可望获得更高精度的北斗广域差分改正信息, 以提高北斗广域差分系统的服务性能。

致谢

审稿人提出的修改建议使本文质量得以提高, 在此致谢。同时也感谢《天文学进展》期刊编辑在论文审稿和接收过程中的细致工作。

参考文献:

- [1] Satellite Based Augmentation System Interoperability Working Group. SBAS L5 DFMC Interface Control Document. Issue 1, Rev 3. Dakar: SBAS IWG, 2016: 35
- [2] Tsai Y. Dissertation. California: Stanford University, 1999
- [3] 陈刘成, 胡小工, 封欣, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 2010, 31: 45
- [4] Cao Y, Hu X, Zhou J, et al. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 305(3): 277
- [5] 吴显兵. 博士论文. 西安: 长安大学, 2016: 81
- [6] 宋伟伟. 博士论文. 武汉: 武汉大学, 2011: 39
- [7] Lou Y, Liu Y, Shi C, et al. Scientific Reports, 2014, 4(8): 4692
- [8] Li X, Ge M, Dai X, et al. Journal of Geodesy, 2015, 89(6): 607
- [9] Tang C, Hu X, Zhou S. Advances in Space Research, 2016, 58(7): 1390
- [10] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 B1I. 1.0 版. (2012). <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/>
- [11] Wu X, Zhou J, Wang G, et al. SCINECE CHINA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(12): 1297
- [12] Cao Y, Hu X, Wu B, et al. SCINECE CHINA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(12): 1130
- [13] Zhou S, Cao Y, Zhou J, et al. SCINECE CHINA: Physics, Mechanics & Astronomy, 2012, 55(12), 2290

Research on Ephemeris and Clock Corrections Algorithm for BeiDou Wide Area Differential Augmentation System

LI Ran^{1,2}, HU Xiao-gong¹, CAO Yue-ling¹, TANG Cheng-pan¹,
MENG Xin³, CHANG Zhi-qiao⁴

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Surveying and GEO-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

Abstract: The regional BeiDou wide area differential augmentation system provides one-dimensional equivalent satellite clock correction to uniform satellite clock and ephemeris error. With the development of system construction, the global BeiDou wide area differential augmentation system will distinguish between satellite orbit correction and satellite clock correction to improve the accuracy of differential correction. Due to the limitations of the Beidou hybrid constellation design and the regional monitoring network, it poses a challenge for the high precision separation of orbital and satellite clock error. In this paper, we study the satellite orbit and clock offset estimation algorithms of the BeiDou wide area differential augmentation system, the processing strategies of dynamic and kinematic wide area differential algorithms are compared and analyzed, and the positioning accuracy of two methods is compared based on the BeiDou measured data. The results show that: using dynamic, kinematic wide area differential model, the dual frequency real-time positioning accuracy are 1.76 m and 1.78 m, which are comparable with the performance of WAAS and EGNOS. The dynamic and kinematic wide area differential modes can all get decimeter-level precise point positioning (PPP) results. With dynamic corrections, the precision of PPP experiments may reach to about 15 cm after convergence.

Key words: BeiDou satellite navigation system; satellite based augmentation system; wide area differential algorithm; PPP